http://bhxb. buaa. edu. cn jbuaa@ buaa. edu. cn
DOI: 10. 13700/j. bh. 1001-5965. 2014. 0301

基于脉冲激光定位的 SRAM 单粒子闩锁事件率预估

余永涛[1,2]，韩建伟[*1]，封国强[1]，蔡明辉[1]

(1. 中国科学院 空间科学与应用研究中心，北京 100190； 2. 中国科学院大学，北京 100049)

摘　　要： 器件单粒子闩锁效应(SEL)预估方法一般是建立在只有一个敏感体积单元的长方体(RPP)模型上，静态随机存储器(SRAM)单粒子闩锁敏感区的定位试验结果表明敏感体积单元不仅有一个. 利用脉冲激光定位 SRAM K6R4016V1D 单粒子闩锁效应敏感区的试验结果对器件在轨 SEL 事件率进行了修正计算. 首先利用脉冲激光定位 SRAM SEL 敏感区，获得敏感区的分布情况，并确定整个器件敏感体积单元的数量. 然后针对不同的空间轨道、辐射粒子以及敏感体积厚度和敏感体积单元数进行了相应的器件 SEL 事件率计算，并对计算结果进行了分析讨论. 结果表明，重离子引起的 SEL 事件率随敏感体积单元数量的增大而减小；修正敏感体积单元数量对预估质子引起的 SEL 事件率非常必要，否则将会过高评估质子直接电离作用对 SEL 事件率的贡献.

关　键　词： SEL 事件率；敏感区定位；敏感体积单元；质子直接电离；静态随机存储器；脉冲激光

中图分类号： V520.6；TN4

文献标识码： A　　**文章编号：** 1001-5965(2015)04-0609-07

当空间辐射环境中的高能带电粒子入射到航天器电子设备中的 CMOS 器件时，易诱发单粒子闩锁效应(SEL，Single Event Latchup)，导致器件失效甚至航天器仪器故障. 单粒子闩锁效应一直以来都是国内外单粒子效应研究的热点，随着半导体工艺尺寸的减小，亚微米器件应用于航天设备后表现出对单粒子闩锁效应的极端敏感性[1-3]. 根据器件地面辐射模拟试验数据和航天器轨道的辐射环境模型，预估器件在轨单粒子效应，对正确选用宇航半导体器件、提高航天器寿命和可靠性具有重大的现实意义，对评价半导体器件的抗单粒子效应能力也具有重要的指导作用和参考价值.

多数单粒子效应预估程序都是建立在 RPP (Rectangular Parallelepiped) 敏感体积模型基础上，模拟入射粒子在敏感体积内的能量沉积. 对于器件单粒子闩锁在轨预估，单粒子闩锁效应没有类似于存储类器件单粒子翻转效应存储位单元的概念，因而在预估计算时多是假设整个器件只存在一个敏感体积单元(SV，Sensitive Volume). 近年来，一系列脉冲激光定位静态随机存储器(SRAM)单粒子闩锁效应敏感区的试验结果[4-7]表明，SRAM 器件的 SEL 敏感区是由许多具有周期性的较小尺寸的 SEL 敏感区构成的，即 SRAM

收稿日期： 2014-05-27；**录用日期：** 2014-09-26；**网络出版时间：** 2014-12-09 15:31
网络出版地址： www. cnki. net/kcms/detail/11. 2625. V. 20141209. 1531. 003. html
基金项目： 中国科学院支撑技术资助项目(110161501038)
作者简介： 余永涛(1987—)，男，河南宝丰人，博士生，yuyongtao10@ mails. ucas. ac. cn
* **通讯作者：** 韩建伟(1970—)，男，河南长葛人，研究员，hanjw@ nssc. ac. cn，主要研究方向为航天元器件和材料的空间环境效应研究与应用.

引用格式：余永涛，韩建伟，封国强，等. 基于脉冲激光定位的SRAM 单粒子闩锁事件率预估[J]. 北京航空航天大学学报，2015，41(4)：609-615. Yu Y T，Han J W，Feng G Q，et al. SEL rate prediction for SRAM using pulsed laser sensitivity mapping[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2015，41(4)：609-615 (in Chinese).

SEL 敏感体积单元的数量不是只有一个，这将会对 SRAM 器件空间 SEL 事件率预估产生影响. 如文献[4]和文献[7]的论述，在只有一个敏感体积单元的假设下，在进行 SEL 事件率预估时，根据试验测得的截面数据建立的 RPP 模型的横向尺寸很大，离子倾斜入射时电荷收集路径很长，线性能量传输(LET，Linear Energy Transfer)值低而射程长的离子倾斜入射到器件敏感区时也可沉积足够的电荷而诱发 SEL. 在各向同性辐射环境中，粒子倾斜入射的可能性很大，入射倾角大于等于60°的粒子比例为 50%. 实际情形是，SRAM SEL 敏感体积的横向尺寸是有限的，离子倾斜入射时电荷收集路径也是有限的. 与真实情况相比，假设整个器件只存在一个敏感体积单元的传统预估方法最终会得到一个相对保守的事件率预估结果. 对于修正敏感体积单元数量以改进 SEL 事件率预估，以往的工作多是进行定性讨论，没有系统地论述如何修正以及敏感体积单元数量的修正对 SEL 事件率预估有多大程度的影响.

本文工作主要分为 3 部分，一是利用脉冲激光定位 SRAM K6R4016V1D SEL 敏感区，获得不同尺度下敏感区的分布情况，进而确定器件敏感体积单元的数量；二是针对地球同步轨道和极轨道 2 种典型空间轨道辐射环境，利用 OMERE 软件计算不同条件下器件在轨 SEL 事件率；最后对比讨论不同情况下敏感体积单元数对 SEL 事件率预估结果的影响.

1 激光定位试验

1.1 脉冲激光定位 SEL 敏感区试验系统及方法

脉冲激光单粒子效应(SEE)敏感区定位成像系统示意图如图 1 所示. 主要有 4 部分构成：脉冲激光辐照装置、单粒子效应检测系统、电动移动台、同步控制装置. 利用聚焦后的脉冲激光对被测器件进行逐点辐照，同时利用单粒子效应检测系统实时检测被测器件的单粒子效应，利用移动台实现被测器件不同区域的扫描测试，同步控制装置将脉冲激光辐照、单粒子效应检测、电动移动台移动同步控制起来，并将每个辐照位置的激光脉冲注量、单粒子效应数据、物理坐标对应起来传输到计算机，最终将单粒子效应敏感位置显示为二维图像.

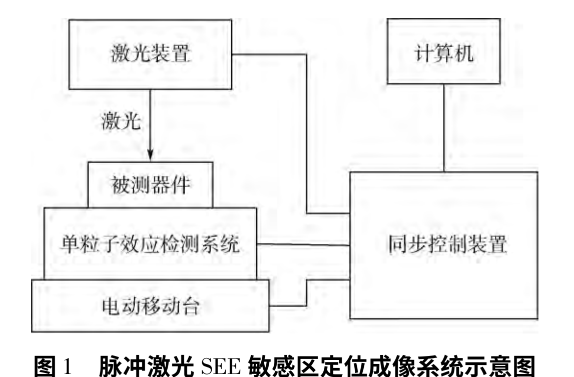


图 1 脉冲激光 SEE 敏感区定位成像系统示意图

Fig. 1 Schematic of pulsed laser facility for SEE sensitivity mapping

SEL 敏感区定位测试流程图如图 2 所示. 首先是初始化被测器件和设定试验测试条件，包括使被测器件正常工作、使激光聚焦定位在测试原点及调节脉冲激光能量等. 然后开始脉冲激光辐照，同时利用单粒子效应检测系统实时监测被测器件的供电电流，一旦电流值超过设定的限值，对被测器件断电. 脉冲激光能量和 SEL 的电流值以及辐照位置对应的物理坐标会被记录下来，这个坐标就是发生 SEL 的物理位置. 断电延时一段时间后，检测系统恢复被测器件供电，接着移动台移动一定的距离到下一个测试位置，重复以上过程，直到完成对所选区域的扫描测试，最终可以获得器件测试区域内的 SEL 敏感位置分布图.

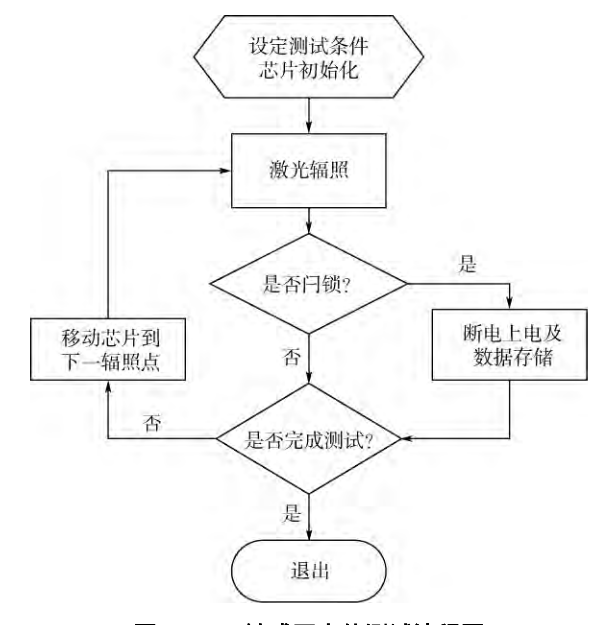


图 2 SEL 敏感区定位测试流程图

Fig. 2 State diagram of SEL sensitivity mapping

1.2 脉冲激光定位 SEL 敏感区试验及结果

试验样品为 SAMSUNG SRAM K6R4016V1D，容量为 256 K × 16 bit，工作电压为(3.3 ± 0.3) V，芯片大小为 0.46 × 0.52 cm^2. 这款器件在重离子试验中表现出对 SEL 非常敏感[8]. 为避开器件正面金属层对激光的阻挡作用，激光辐照试验采用背部辐照方法. 根据不同的测试尺度，移动台的步距分别设定为 10，5，1 μm. 测试过程中，激光光斑直径约为 1.7 μm[9]，每个测试位置辐照 1 个激光

脉冲，各点的脉冲激光能量相同.

不同尺度及扫描步距下 SEL 敏感区位图如图 3 所示. 图中浅色带状区域是 SEL 敏感位置，深色背景是器件的显微图片. 如图 3(a) 所示，首先对整个器件的上半部分进行测试，占器件总面积的 1/2，激光辐照扫描的步距是 10 μm，可以看出 SEL 敏感区位于 SRAM 器件存储阵列部分，而周围的电路部分对 SEL 不敏感. 为了更好地表现 SEL 敏感区分布情形，对其中局部区域进行放大，如图 3(b) 所示，敏感区表现出明显的带状分布图形. 增加激光辐照扫描定位精度，移动步距减小为 5 μm. 如图 3(c) 所示，对其中大小为 200 μm × 200 μm的区域进行测试，结果显示 SEL 敏感区仍具有周期性的重复结构，在该测试区域内约有 4×9个周期结构. 最后，进一步减小激光辐照扫描的步距为 1 μm，使用能量稍高于 SEL 阈值能量的脉冲激光对上述周期结构中的一个进行 SEL 敏感区测试. 如图 3(d) 所示，在 20 μm×30 μm 的区域内，SEL 敏感区表现出周期性图形，由 5 个单一 SEL 敏感区组成.

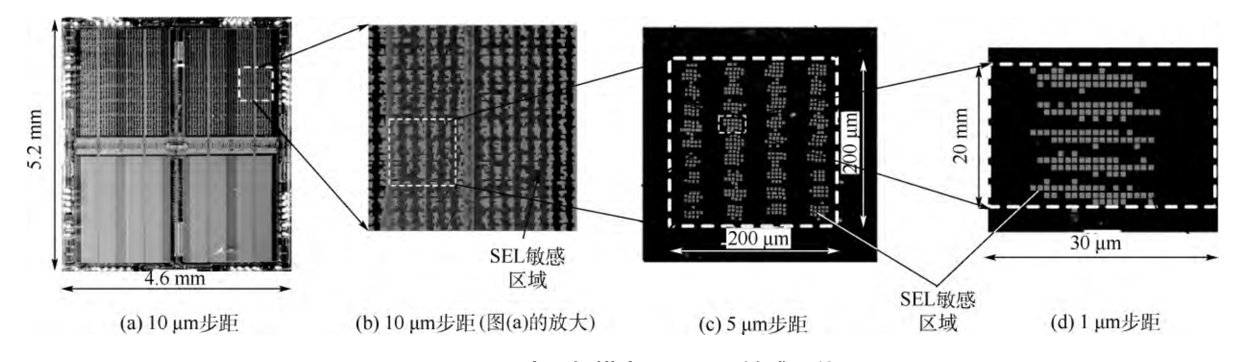


图 3　不同尺度及扫描步距下 SEL 敏感区位图

Fig. 3　SEL sensitivity mappings at different scales with different scanning steps

从图 3(a) 中可以看出，整个器件的存储阵列部分对 SEL 的敏感性没有显著差异，而且器件 SEL 的电流均在 250 ~ 300 mA 范围内，因而认为器件所包含的众多 SEL 敏感区对辐照的敏感性是一致的. 根据以上的试验结果和测试器件的相关信息，可计算整个器件包含单一 SEL 敏感区的数量. 在器件的上半部分，存储阵列区域在竖直方向上的尺寸为 2 200 μm，而敏感区在横向上共有 64 条周期结构，而在竖直方向上 200 μm 范围内共有9 个周期结构，而其中一个周期结构包含5 个单一 SEL 敏感区. 则在不同的扫描步距的情况下，整个器件包含 SEL 敏感体积的数量 N 估算如下：

$$10\ \mu\text{m}: N = 2 \times 64 = 128$$

$$5\ \mu\text{m}: N = 2 \times 64 \times 2\,200 \times 9/200 = 12\,672$$

$$1\ \mu\text{m}: N = 2 \times 64 \times 2\,200 \times 9 \times 5/200 = 63\,360$$

2　SEL 事件率修正计算

通过以上试验获得了不同定位尺度下 SRAM K6R4016V1D 单粒子闩锁效应敏感区的二维周期分布图. SEL 敏感区的周期性分布对器件 SEL 在轨事件率预估具有重要的影响. 在预估器件 SEL 事件率时，一般利用试验测得的闩锁阈值和截面数据，根据 RPP 模型进行计算. 经典的预估方法是假设整个器件只有一个敏感体积单元，收集沉积在敏感体积内的电荷，沉积电荷量与离子穿过敏感体积的路径相关. 根据试验测得的截面数据建立的经典 RPP 模型的横向尺寸很大，离子倾斜入射时电荷收集路径很长，因而低 LET 值而长射程的离子倾斜入射到器件敏感区时也可沉积足够的电荷而诱发 SEL. 而激光定位的试验结果表明，SRAM SEL 敏感区具有周期重复性，在相邻的敏感区之间存在不敏感的区域. 离子入射到任意单一 SEL 敏感区都可使整个器件发生 SEL，而单一 SEL 敏感区的横向尺寸远小于经典模型的横向尺寸. 这样传统的 SEL 事件率预估方法将会高估 SEL 截面，最终给出比真实情况更保守的结果，这可能会对正确评估和选用宇航器件产生重大影响.

根据以上试验结果及分析，类似于存储器件"存储单元"的概念，认为 SRAM 器件 SEL 敏感区由 N 个敏感体积单元组成. 为了表现 SEL 事件率随敏感体积单元数量的变化趋势，在以下部分，将通过计算，对比在不同的敏感体积单元数情况下器件在轨 SEL 事件率. 器件在轨 SEL 事件率计算的基础是器件地面模拟试验截面数据、器件所在轨道的空间环境辐射模型和高能粒子与器件相互作用模型. K6R4016V1D SRAM 重离子测试结果及韦伯拟合参数如表 1 所示[8].

表 1 K6R4016V1D SRAM 重离子测试结果及韦伯拟合参数[8]

Table 1 K6R4016V1D SRAM heavy ion test result and Weibull parameters[8]

参数	LET 阈值/(MeV·cm^2·mg^{-1})	饱和截面/cm^2	尺度参数 W/(MeV·cm^2·mg^{-1})	形状参数 S
数值	1.0	0.06	9	3.5

所有计算都是采用 OMERE V3.6[10] 软件. 为了研究不同轨道辐射环境下敏感体积单元数对 SEL 事件率的影响,选取地球同步轨道(GEO)(35 870 km,0°)和极轨低地球轨道(LEO)(800 km,98°)2 种典型空间轨道,重离子辐射环境模型为银河宇宙线,质子辐射环境模型为俘获带质子模型 AP8min,采用 3.0 mm Al 等效屏蔽,不考虑太阳活动异常. 器件在轨 SEE 预估过程中,一般根据器件工艺确定 RPP 模型的敏感体积厚度,对于 CMOS/epi 工艺一般取 2 μm[11]. 但对于单粒子闩锁效应这可能不再适用,因而在计算敏感体积厚度时还取 3 μm[5]. 对应不同的敏感体积单元数量,SEL 敏感体积横向尺寸如表 2 所示.

表 2 SEL 敏感体积横向尺寸

Table 2 Lateral dimensions of SEL sensitive volume

参数	SV 数量			
	1	128	12 672	63 360
横向尺寸/μm^2	2 450 × 2 450	271.6 × 217.6	21.8 × 21.8	9.7 × 9.7

2.1 重离子 SEL 事件率

对应不同的敏感体积单元数和敏感体积厚度,利用 OMERE 计算的地球 GEO 轨道重离子 SEL 事件率如图 4 所示.

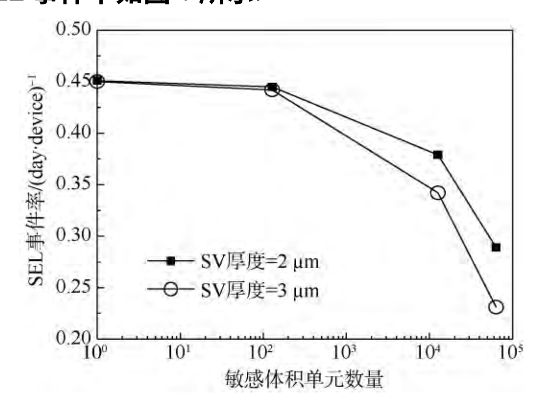


图 4 地球 GEO 轨道重离子 SEL 事件率

Fig. 4 Heavy ion SEL predicted rates of GEO

从图 4 中可以看出,随着敏感体积单元数量的增大,SEL 事件率逐渐减小,SEL 事件率对敏感体积厚度变得敏感. 在敏感体积厚度为 2 μm 而敏感体积单元数量由 1 增加到 63 360 时,SEL 事件率由 0.45 (day·device)$^{-1}$ 减小到 0.28 (day·device)$^{-1}$. 另外,当敏感体积单元数较小时,SEL 事件率与敏感体积厚度基本无关;当敏感单元数增大到 12 672 和 63 360 时,敏感体积厚度增大,SEL 事件率明显减小.

图 5 为极轨道重离子 SEL 事件率. 可以看出,极轨道辐射环境下的计算结果与同步轨道的计算结果表现出同样的趋势. 在敏感体积厚度为 2 μm 而敏感体积单元数量增加到 63 360 时,SEL 事件率由 0.14 (day·device)$^{-1}$ 减小到 0.08 (day·device)$^{-1}$.

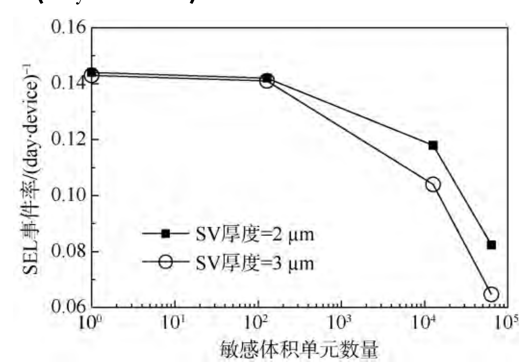


图 5 极轨道重离子 SEL 事件率

Fig. 5 Heavy ion SEL predicted rates of polar LEO

2.2 质子 SEL 事件率

对于空间辐射环境中质子诱发的 SEL,主要针对 LEO 极轨道考虑俘获带质子诱发的 SEL,质子环境模型采用 AP8min,使用 SIMPA 等效模型计算质子 SEL 截面. SIMPA 是一个基于重离子数据计算质子 SEE 的半经验模型,计算质子 SEE 截面的公式为[12]

$$\sigma_p(E_P) = \int_{E_s} \sigma_{II}(E) \Phi(E, E_P) \mathrm{d}E$$

式中,$\sigma_p(E_p)$ 为质子能量为 E_p 时的 SEE 截面;$\sigma_{II}(E)$ 为重离子 SEE 的截面;E_s 为重离子试验的单粒子效应阈值能量;$\Phi(E, E_p)$ 是入射能量为 E_p 的质子在敏感体积内沉积能量为 E 的概率. 公式中各项参数是根据质子与 Si 核反应的 Monte Carlo 模拟以及质子沉积能量测量结果确定的,极轨道质子 SEL 事件率(OMERE SIMPA)如图 6 所示.

从图 6 中可以看出,对应同样的敏感体积厚度,敏感体积单元数对 SEL 事件率计算没有影响. 敏感体积厚度增加,SEL 事件率略有减小.

利用 SRIM 计算了 2 MeV 和 10 MeV 质子 LET 值随粒子在 Si 中穿透深度的变化. 在 Bragg 峰附近质子的 LET 值可达到 0.5 MeV·cm^2·mg^{-1},10 MeV 质子在 Si 中射程可达 710 μm. 质子直接电

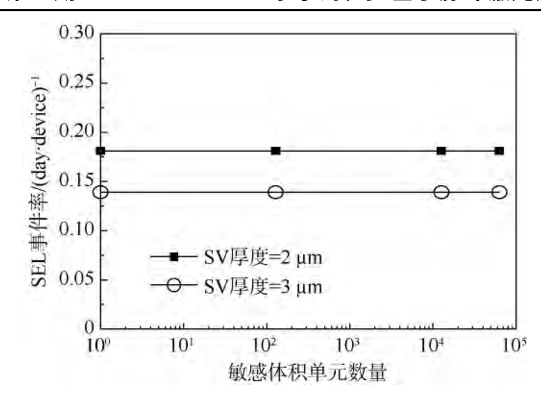


图6　极轨道质子 SEL 事件率(OMERE SIMPA)

Fig. 6　Proton SEL predicted rates of polar LEO(OMERE SIMPA)

离作用对 SEE 的贡献通常是忽略不计的，但对于 SEE 阈值较低的器件则需要考虑[13-14]．这款器件 SEL 阈值低、截面大，俘获带质子的能量范围为 0.1 ~400 MeV，高能质子倾斜入射时有效 LET 值可以远高于测试器件的 LET 阈值，质子的直接电离作用也可能会对 SEL 产生贡献．

图7是利用 OMERE 得到的极轨道俘获带质子 LET 谱．利用质子的 LET 谱和重离子截面测试数据进行了 SEL 事件率计算，最终结果如图8所示．

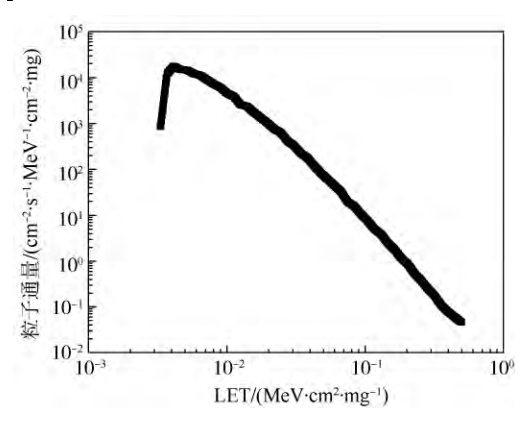


图7　极轨道俘获带质子 LET 谱

Fig. 7　Trapped proton LET spectrum of polar LEO

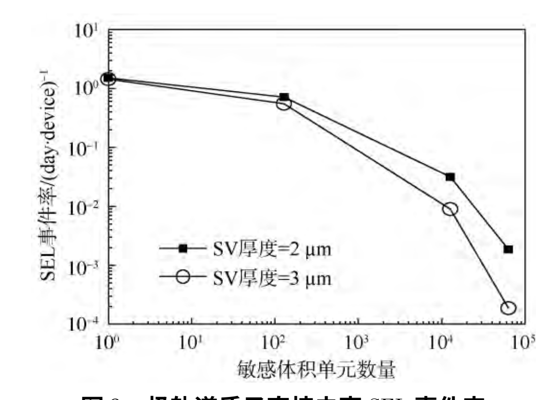


图8　极轨道质子直接电离 SEL 事件率

Fig. 8　Proton SEL predicted rates of polar LEO by direct ionization

从图8中可以看出，计算结果与重离子 SEL 事件率计算结果相似，但敏感体积单元数对 SEL 事件率有很大影响．在敏感体积厚度为 2 μm 时，敏感体积数由 1 增加到 63 360，SEL 事件率减小了3个数量级．在敏感体积厚度为 3 μm 时，敏感体积数由 1 增加到 63 360，SEL 事件率减小了4个数量级．

3　敏感体积单元数量对 SEL 事件率的影响

3.1　重离子 SEL 事件率

2.1节针对地球同步轨道和极轨道利用 OMERE 计算分析了敏感体积单元数对重离子 SEL 事件率的影响，2种轨道的计算结果所表现出的趋势是一致的．

对应同样的敏感体积厚度，随着敏感体积单元数增加，SEL 事件率逐渐减小．当敏感体积单元数从 1 增加到 128 时，SEL 事件率变化不大．当敏感体积单元数增大到 12 672 和 63 360 时，SEL 事件率明显减小．敏感体积厚度为 3 μm 时，对应地球同步轨道和极轨道 SEL 事件率分别减小了 48.7%和 55.1%．对于其他情形，敏感体积单元数修正引起的改变更小．器件在轨 SEL 预估涉及众多因素，相对于地面模拟试验数据、飞行试验数据、空间辐射环境模型和粒子与器件相互作用模型等因素带来的误差[15]，敏感体积单元数的影响不大．

另外，当敏感体积单元数比较小时 SEL 事件率与敏感体积厚度基本无关．特别是按照传统的 SEL 预估方法，敏感体积单元数量为 1，对应2种敏感体积厚度的情况，SEL 事件率计算结果基本相等．当敏感体积单元数增大到 12 672 和 63 360 时，敏感体积厚度增大，SEL 事件率明显减小．敏感体积厚度的增大相当于增大了临界电荷量，因而随着敏感体积厚度的增大，SEL 事件率减小．当敏感体积单元数为 1，根据试验的截面数据建立的敏感体积单元的横向尺寸远大于纵向尺寸．空间辐射环境中的多数重离子具有低 LET 值而长射程的特点．这些倾斜入射的重离子在敏感体积内沉积的电荷量要高于临界电荷量，临界电荷量的小幅度增加对 SEL 事件率基本没有影响，因而敏感体积厚度改变对传统 SEL 事件率预估几乎没有影响．

3.2　质子 SEL 事件率

2.2节针对极轨道分别利用 OMERE SIMPA 模型和俘获带质子的 LET 谱计算分析了俘获带质子引起的 SEL 事件率．利用 OMERE SIMPA 计

算，在相同的敏感体积厚度下，敏感体积单元数对SEL事件率计算没有影响. 根据SIMPA模型的计算方法，质子引起单粒子效应是通过核反应产生二次离子导致，不需要考虑入射质子空间方向上的差异，而敏感体积单元数量的修正影响的就是倾斜入射的粒子，因而质子SEL事件率与敏感单元数无关. 另外即使能够获得完整的质子单粒子效应截面地面辐照试验数据，根据Bendel双参数公式拟合截面进而预估质子单粒子效应，敏感体积单元数对结果也没有影响.

考虑到这款器件SEL阈值低、截面大，利用俘获带质子LET谱和重离子测试数据进行了SEL事件率计算. 敏感体积单元数对SEL事件率有很大影响. 在敏感体积厚度为2 μm时，敏感体积数由1增加到63 360，SEL事件率减小了3个量级. 这与俘获带质子有密切关系，根据计算的质子LET谱和对应能谱，能够通过直接电离作用引起SEL的是具有低LET值、高能量、长射程的质子. 对这款器件的计算表明，能量至少大于10 MeV的质子倾斜入射才可能通过直接电离诱发被测器件发生SEL. 经过敏感体积单元数修正后，敏感体积单元的横向尺寸大幅减小，这些质子沉积的电荷不足以引起SEL.

对比图5、图6与图8，在敏感体积厚度为2 μm的情况下，敏感体积数为1时质子直接电离引起的SEL事件率比质子核反应引起的SEL事件率及宇宙线重离子引起的SEL事件率高一个量级，在敏感体积数为63 360时，质子直接电离引起的SEL事件率可以忽略. 这说明敏感体积单元数的修正对SEL事件率计算的影响很大，否则将会严重高估质子直接电离作用对SEL事件率的贡献[13]. 另外对于质子直接电离引起的SEL事件率，敏感体积单元数修正后，SEL事件率对敏感体积厚度非常敏感，敏感体积厚度从2 μm增加到3 μm，SEL事件率减小了1个量级. 总之无论是重离子SEL事件率预估还是质子的SEL事件率估，敏感体积单元数修正后SEL事件率对敏感体积厚度变得相对敏感.

最后需要说明的是，以上计算分析了在不同的轨道、粒子、敏感体积厚度等条件下，敏感体积单元数对SRAM K6R4016V1D SEL事件率预估的影响. SEL事件率预估结果还与器件本身的抗辐射参数有关. 质子单粒子效应预估有许多种不同的计算方法[16]，本文采用的是基于重离子测试数据计算质子SEL事件率的SIMPA模型，对于其他方法计算结果的影响有待于进一步研究. 另外激光定位SEL敏感区的试验结果表明，单一SEL敏感区的长宽比很高，而本文主要关注的问题是敏感体积单元数量，在计算中设定敏感体积的长宽相等，这也是后续需要改进的部分.

4 结 论

利用脉冲激光定位SRAM K6R4016V1D单粒子闩锁效应敏感区的试验结果对器件在轨SEL事件率进行了改进计算. 结论如下：

1）脉冲激光具有快速准确定位SEL敏感区的优势，可以在一定精度下确定器件的SEL敏感单元数量. 测试器件的SEL敏感区具有周期重复性，是由63 360个单一SEL敏感体积单元组成.

2）对于重离子引起的SEL事件率，当敏感体积单元数较小时，SEL事件率基本不随敏感体积单元数而变化；当敏感体积单元数增大到63 360时，SEL事件率的减小较明显，SEL事件率减小的最大幅度约为50%.

3）敏感体积单元数对质子核反应引起的SEL事件率没有影响，这与采用的计算模型有关；但敏感体积单元数量的修正对计算质子直接电离引起的SEL事件率非常必要，否则将会过高评估质子直接电离作用对总的SEL事件率的贡献.

参考文献（References）

[1] Page Jr T E，Benedetto J M. Extreme latchup susceptibility in modern commercial-off-the-shelf（COTS）monolithic 1 M and 4 M CMOS static random-access memory（SRAM）devices［C］//Radiation Effects Data Workshop. Seattle：IEEE，2005：1-7.

[2] 韩建伟，张振龙，封国强，等. 单粒子锁定极端敏感器件的试验及对我国航天安全的警示［J］. 航天器环境工程，2008，25（3）：265-267.
Han J W，Zhang Z L，Feng G Q，et al. The radiation test of SRAM devices for extreme single event latch-up susceptibility and a warning to our aerospace safety［J］. Spacecraft Environment Engineering，2008，25（3）：265-267（in Chinese）.

[3] 余永涛，封国强，陈睿，等. SRAM K6R4016V1D单粒子闩锁及防护试验研究［J］. 原子能科学技术，2012，46（增刊）：587-591.
Yu Y T，Feng G Q，Chen R，et al. Experimental study on single event latchup of SRAM K6R4016V1D and its protection technology［J］. Atomic Energy Science and Technology，2012，46（Suppl.）：587-591（in Chinese）.

[4] Burnell A J，Chugg A M，Harboe-Sørensen R. Laser SEL sensitivity mapping of SRAM cells［J］. IEEE Transactions on Nuclear Science，2010，57（4）：1973-1977.

[5] Faraud E，Pouget V，Shao K，et al. Investigation on the SEL sensitive depth of an SRAM using linear and two-photon absorption laser testing［J］. IEEE Transactions on Nuclear Science，2011，

58(6):2637-2643.

[6] Dodds N A, Hooten N C, Reed R A, et al. SEL-sensitive area-mapping and the effects of reflection and diffraction from metal lines on laser SEE testing [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2013, 60(4):2550-2558.

[7] 余永涛，封国强，陈睿，等. CMOS SRAM 器件单粒子锁定敏感区的脉冲激光定位试验研究 [J]. 航天器环境工程，2014，31(2):150-153.
Yu Y T, Feng G Q, Chen R, et al. Research of SEL sensitive region of CMOS SRAM by pulsed laser mapping facility [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2014, 31(2):150-153 (in Chinese).

[8] Ferlet-Cavrois V, Muschitiello M, Alessio D M. Single event latch-up (SEL) analysis of the 256 k × 16 SRAM samsung K6R4016V1D-TC10, RA0660 [R]. Noordwijk: ESA/ESTECT-EC-QEC, 2013.

[9] Yu Y T, Feng G Q, Chen R, et al. Laser SEU sensitivity mapping of deep submicron CMOS SRAM [J]. Journal of Semiconductors, 2014, 35(6):064011-1-064011-4.

[10] OMERE softwareversion 3.6 [CP/OL]. http://www.trad.fr/OMERE-Software.html.

[11] Petersen E L, Pickel J C, Adams J H, et al. Rate prediction for single event effects-a critique [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1992, 39(6):1577-1599.

[12] Douct B, Patin Y, Buisson J, et al. Characterization of proton interactions in electronic components [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1994, 41(3):593-600.

[13] Bezerra F, Ecoffet R, Lorfèvre E, et al. CARMEN2/MEX: an in-flight laboratory for the observation of radiation effects on electronic devices [C] //12th European Conference on Radiation and its Effects on Components and Systems (RADECS). Piscataway, NJ: IEEE, 2011:607-614.

[14] Artola L, Velazco R, Hubert G, et al. In flight SEU/MCU sensitivity of commercial nanometric SRAMs: operational estimations [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2011, 58(6):2644-2651.

[15] Bezerra F, Lorfevre E, Ecoffet R, et al. In flight observation of proton induced destructive single event phenomena [C] //European Conference on Radiation and its Effects on Components and Systems (RADECS). Piscataway, NJ: IEEE, 2009:126-132.

[16] Petersen E L. Approaches to proton single-event rate calculations [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1996, 43(2):496-504.

SEL rate prediction for SRAM using pulsed laser sensitivity mapping

YU Yongtao[1,2], HAN Jianwei*[1], FENG Guoqiang[1], CAI Minghui[1]

(1. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The classical approaches for single event latchup (SEL) rate prediction are based on the rectangular parallelepiped (RPP) model of only one sensitive volume. However, the experiment results of SEL sensitivity mapping of static random access memory (SRAM) show that the device has not only one sensitive volume (SV). The in-flight SEL rate of the device was corrected using the experiment results of pulsed laser SEL sensitivity mapping of SRAM K6R4016V1D. The SEL sensitivity maps of the SRAM by pulsed laser were first obtained and then the SV number of the device was calculated. The SEL rates of the device were predicted and discussed for different space orbits, radiation particles, SV thicknesses and SV number in particular. The results show that SEL rate caused by heavy ion decreases with SV number. The correction of the SV number is essential for SEL rate due to proton direct ionization; otherwise, the contribution of direct ionization of protons to SEL rate would be greatly overestimated.

Key words: SEL rate; sensitivity mapping; sensitive volume; direct ionization of proton; SRAM; pulsed laser